

مقایسه توانایی روش‌های مختلف ترکیبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت قروه - دهگلان

عطاالله ندیری^{۱*}، ناصر جبرائیلی^۲، مریم قره‌خانی^۳

۱. دانشیار، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۱/۲۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۳۱)

چکیده

دشت قروه-دهگلان بزرگ‌ترین دشت استان کردستان است که از نظر کشاورزی اهمیت زیادی برای این استان دارد. در سال‌های اخیر با توسعه کشاورزی، تمایل به استفاده از کودهای شیمیایی افزایش یافته و آبخوان‌های این دشت را در معرض آلودگی قرار داده است. بنابراین، تعیین مناطق آسیب‌پذیر برای مدیریت نواحی در معرض خطر، امری ضروری است. در تحقیق حاضر آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI بررسی شده است. برای دستیابی به نتایج بهتر، روش‌های منفرد یادشده با روش‌های ترکیبی نظارت‌شده شامل مدل فازی ساجنو، الگوریتم ژنتیک و نیز روش‌های نظارت‌نشده شامل روش مربوط به شاخص همبستگی (CI) ترکیب شدند. نتایج نشان داد شاخص همبستگی هر سه روش ترکیبی بیشتر از روش‌های منفرد (DRASTIC، SINTACS و SI) است و بین روش‌های ترکیبی، مدل فازی ساجنو بیشترین شاخص همبستگی را دارد و همچنین ضریب همبستگی این روش از باقی روش‌های ترکیبی و منفرد بیشتر است. مدل فازی ساجنو توانست ۳۷ درصد ضریب همبستگی و ۷ درصد شاخص همبستگی را نسبت به نتایج بهترین مدل منفرد افزایش دهد. بنابراین، روش ترکیبی نظارت‌شده مدل فازی ساجنو برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان نسبت به بقیه روش‌ها بهتر است. براساس مدل فازی ساجنو، بخش‌های شمال غرب و جنوب شرق دشت پتانسیل آلودگی بیشتری نسبت به سایر مناطق آنجا دارند و باید محافظت بیشتری از این مناطق صورت بگیرد. بنابراین، می‌توان از روش ترکیبی نظارت‌شده مدل فازی ساجنو برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان‌های دیگر نیز استفاده کرد.

کلیدواژگان: آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، دشت قروه-دهگلان، فازی ساجنو.

مقدمه

بخش درخور توجهی از نیازهای آب کشور ایران به خصوص در بخش شرب و کشاورزی، توسط منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. بنابراین، حفاظت کیفی از آب‌های زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. در بسیاری موارد آلودگی آب‌های زیرزمینی، بعد از آلوده شدن چاه‌های آب شناسایی می‌شوند. رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی بسیار پرهزینه بوده و فرایندی طولانی است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً ممکن نیست. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و محافظت از آن است. تا کنون تعاریف زیادی درباره آسب‌پذیری آبخوان و مفهوم آن در هیدروژئولوژی ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به تعریف کمیته ملی آمریکا در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد [۱]. این کمیته آسب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی، پس از به وجود آمدن آنها در برخی محل‌ها در بالای سطح آبخوان می‌داند [۲]. به‌طور کلی، روش‌های ارزیابی آسب‌پذیری را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که عبارت‌اند از: رتبه‌دهی توصیفی، آماری-تحلیلی و روش ترکیبی [۳]. از مهم‌ترین روش‌های رتبه‌دهی می‌توان به [۴GOD]، [۵DRASTIC]، [۶AVI]، [۷SINTACS]، [۸SI] اشاره کرد. این روش‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های به وجودآمده از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند و اساس کار یکسانی دارند و همچنین بر ارزیابی توصیفی و کمی آسب‌پذیری تکیه دارند. این روش‌ها در به‌کارگیری نوع و تعداد پارامترها با هم متفاوت‌اند، ولی درنهایت به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی منجر می‌شوند. در خصوص ارزیابی آسب‌پذیری و آلودگی آب زیرزمینی با این روش‌ها، مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است که می‌توان آنها را به چهار دسته کلی تقسیم کرد: الف) استفاده منفرد هر یک از روش‌ها [۹-۱۱]، ب) کاهش اعمال نظرهای کارشناسی در وزن‌دهی و رتبه‌دهی با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و الگوریتم ژنتیک در تصحیح وزن‌ها [۱۲-۱۴]، ج) مقایسه توانایی چند روش برای یک منطقه مطالعاتی [۱۵ و ۱۶]، د) ترکیب خطی نظارت‌نشده [۱۷].

جوانشیر و همکارانش (۱۳۹۵) طی پژوهشی به‌منظور ارزیابی آسب‌پذیری آبخوان دشت مغان، روشی برمبنای

ترکیب DRASTIC، SINTACS و SI ارائه کردند. روش جدید از ترکیب وزن‌دار سه روش یادشده به دست آمد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با داده‌های میدانی غلظت نترات نشان داد روش پیشنهادی شاخص همبستگی بیشتری دارد [۱۷].

همچنین، ندیری و همکاران (۲۰۱۷ a,b,c) با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی منفرد و مدل‌های ترکیبی، آسب‌پذیری آبخوان‌ها را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های ترکیبی توانایی بیشتری در ارزیابی آسب‌پذیری دارد [۱۸-۲۰]. در مطالعه دیگری توسط ندیری و همکاران (۲۰۱۸ a,b) ارزیابی آسب‌پذیری با ارائه روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی وزن و رتبه چهارچوب‌های مختلف با استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی ارائه دادند [۲۱]. در هیچ‌یک از تحقیقات یادشده روش‌های مختلف آسب‌پذیری مانند DRASTIC، SINTACS، SI با استفاده از روش ترکیبی نظارت‌شده ترکیب نشده‌اند.

دشت قروه-دهگلان بزرگ‌ترین دشت استان کردستان است که از نظر کشاورزی اهمیت زیادی برای این استان دارد. در سال‌های اخیر با رشد کشاورزی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، تمایل به استفاده از کودهای شیمیایی نیز افزایش یافته و آبخوان‌های این دشت را در معرض آلوده شدن قرار داده است. بنابراین، به دلیل کیفیت خوب آب‌های زیرزمینی، تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان برای مدیریت نواحی در معرض خطر امری ضروری است. در تحقیق حاضر آسب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI که از پرکاربردترین روش‌های رتبه‌دهی برای ارزیابی آسب‌پذیری آبخوان هستند، بررسی خواهد شد. در ادامه، با توجه به اینکه هر یک از این روش‌ها مزایای خاص خود را دارد، بنابراین به‌منظور دستیابی به نتایج بهتر، از ترکیب DRASTIC، SINTACS و SI با استفاده از روش‌های ترکیبی نظارت‌شده شامل مدل فازی ساجنو، الگوریتم ژنتیک و نیز روش نظارت‌نشده شامل روش ترکیبی مربوط به شاخص همبستگی (CI) بهره گرفته می‌شود.

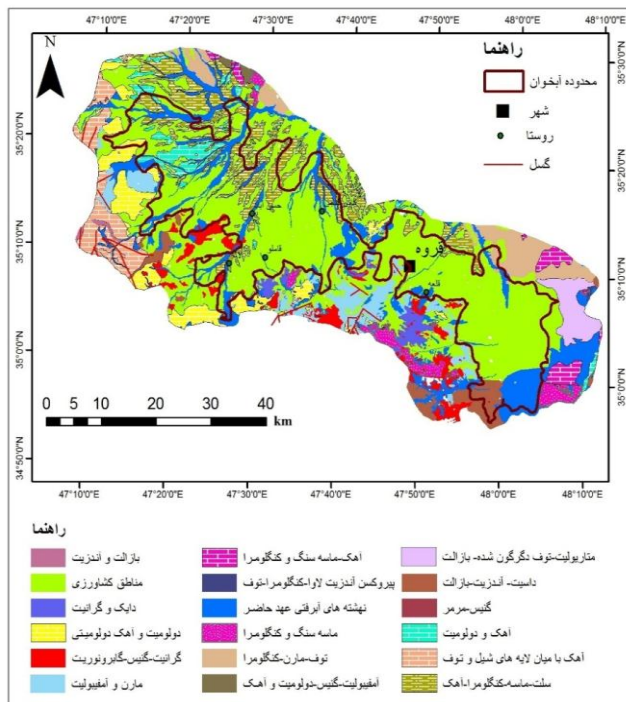
مواد و روش

منطقه مطالعاتی

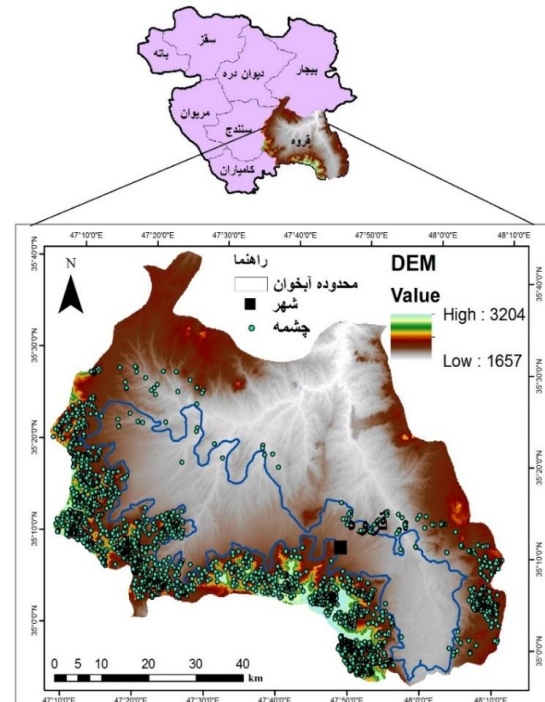
منطقه مطالعه شده دشت قروه-دهگلان است. این دشت در

کنگومرا بیشترین تأثیر را در تغذیه آبخوان آبرفتی دارند (شکل ۲). با توجه به مدل رقومی ارتفاعی منطقه و گسترش وسیع چشمه در جنوب، جنوب غرب و غرب حوضه بیشترین میزان تغذیه آبخوان نیز در این نواحی است (شکل ۱). آبخوان دشت قروه - دهگلان از نوع آزاد است و آبرفت در بخش‌های مختلف دشت ضخامتی بین ۳۰ تا ۱۰۰ متر دارد. به طور کلی، از جنوب و شرق به سمت مرکز دشت ضخامت آبرفت کاهش می‌یابد و از مرکز دشت نیز به سمت شمال و غرب دوباره ضخیم می‌شود.

شرق شهرستان سنندج و شمال غربی همدان قرار دارد. مساحت آبخوان منطقه مطالعه شده حدود ۱۲۷۰ کیلومترمربع است که در شکل ۱ موقعیت آن نشان داده شده است. طبق آمار ۲۰ ساله ایستگاه‌های سنندج، قروه و بیجار، متوسط بارندگی سالانه در این دشت ۳۲۵ میلی‌متر در سال و اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک سرد است. از نظر زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، حوضه آبخیز دشت قروه - دهگلان سازندهای کارستی گسترش وسیعی دارند و سازندهای آهکی و دولومیت دگرگون‌شده، ماسه‌سنگ و



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی حوضه منطقه مطالعاتی



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

[۲۲]. روش دراستیک برگرفته از هفت پارامتر هیدرولوژیکی است که عبارت‌اند از: عمق آب زیرزمینی (D)، میزان تغذیه (R)، محیط آبخوان (A)، جنس بافت خاک (S)، شیب توپوگرافی (T)، تأثیر محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان (C). به هر یک از این پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، مقدار از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود. ۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود و هر یک از پارامترهای روش دراستیک با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی در وزنی بین ۱ تا ۵ ضرب

روش DRASTIC

دراستیک نوعی روش برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی است که در مقیاس ناحیه‌ای طراحی می‌شود. براساس روش دراستیک، پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار در انتقال آلودگی با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش جمع می‌شوند و درنهایت، نقشه آسیب‌پذیری را ارائه می‌دهند [۱۶].

روش دراستیک برای نخستین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آلر معرفی شد [۵] و سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا در سال ۱۹۹۰ آن را به‌عنوان نوعی سیستم استاندارد برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی توسعه داد

$$SI = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + T_R T_W + LU_R LU_W \quad (3)$$

روش ترکیب وزن دار

در مطالعه حاضر، روش ترکیب وزن دار که توسط جوانشیر و همکاران (۱۳۹۵) به منظور ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی ارائه شده است، به کار برده شد. روش ارائه شده با ترکیب نتایج به دست آمده از روش های رایج ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی مانند DRASTIC، SINTACS و SI از مزایای هر سه روش بهره می برد. در ترکیب نتایج روش های ارزیابی آسیب پذیری یاد شده، وزن هریک از روش ها توسط شاخص همبستگی (CI) بین نیترا ت و شاخص آسیب پذیری تعیین می شود. به بیان دیگر، روشی که شاخص همبستگی زیادتری داشته باشد، وزن بیشتری را به خود اختصاص می دهد [۱۸]. شایان یادآوری است که برای روش ترکیبی یاد شده باید توزیع مکانی شاخص آسیب پذیری هر سه روش در بازه یکسانی تغییر کند. به این منظور، نتایج به دست آمده از هر سه روش ارزیابی آسیب پذیری بر اساس رابطه ۴ نرمال سازی شده و به بازه بین صفر و یک تبدیل شدند. رابطه ۵ چگونگی ترکیب نتایج روش های DRASTIC، SINTACS و SI را بر اساس روش ترکیب وزن دار و چگونگی محاسبه شاخص آسیب پذیری (VI) را نشان می دهد.

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

$$VI_{total} = \frac{(CI_{DRASTIC} \times VI_{DRASTIC}) + (CI_{SINTACS} \times VI_{SINTACS}) + (CI_{SI} \times VI_{SI})}{\sum CI_i} \quad (5)$$

الگوریتم ژنتیک (VI-GA)

الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین بوده و بر اساس بقای برترین ها یا انتخاب طبیعی استوار است. نوعی کاربرد متداول الگوریتم ژنتیک، استفاده از آن به عنوان تابع بهینه کننده است. در الگوریتم های ژنتیکی، چگونگی تکامل ژنتیکی موجودات زنده شبیه سازی می شود. این الگوریتم ها با الهام از روند تکاملی طبیعت، مسائل را حل می کنند، به این صورت که مانند طبیعت یک جمعیت انبوه از موجودات را تشکیل می دهند و سپس با اعمال روی این مجموعه به یک مجموعه بهینه و یا موجود بهینه دست می یابند. در این روش هر مسئله بهینه سازی سه بخش پایه و اساسی شامل تابع هدف، متغیر تصمیم یا پارامترها و قیدهای

می شود [۲۳]. از این رو، شاخص دراستیک بر اساس رابطه ۱ محاسبه می شود [۵].

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

در رابطه یاد شده، DI شاخص آسیب پذیری DRASTIC و حروف بزرگ نشان دهنده پارامترهای هفت گانه، r رتبه و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می شود. بنابراین، شاخص آسیب پذیری در این روش از مجموع حاصل ضرب وزن هر پارامتر در رتبه آن به دست می آید.

روش SINTACS

Civita و همکاران (۱۹۹۰) برای بررسی آسیب پذیری جنوب ایتالیا برای نخستین بار روش SINTACS را به کار بردند که در آن هفت پارامتر عمق سطح ایستابی (S)، تغذیه خالص (I)، اثر منطقه غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب توپوگرافی (S) برای پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان استفاده شد. SINTACS از نظر نوع و تعداد پارامترها شبیه روش DRASTIC است، ولی رتبه ها و وزن های آن انعطاف بیشتری دارد [۷]. در SINTACS به هریک از پارامترها بر اساس تأثیر و اهمیتی که در آسیب پذیری ذاتی دارد، رتبه ای بین یک تا ۱۰ و یک وزن نسبی بین یک تا پنج اختصاص داده می شود و در نهایت شاخص آسیب پذیری با رابطه ۲ محاسبه می شود.

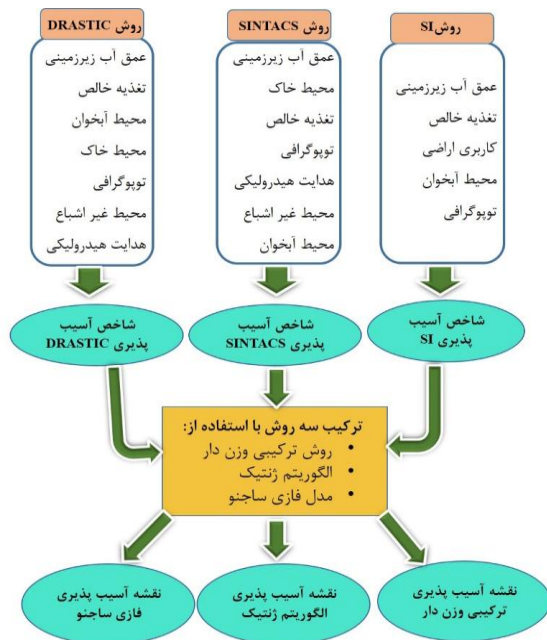
$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad (2)$$

در رابطه ۲، $I_{SINTACS}$ شاخص آسیب پذیری SINTACS، P_i رتبه هر پارامتر و W_i وزن نسبی پارامترهاست.

روش SI

روش SI برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان نسبت به آلاینده های کشاورزی ارائه شده است که در آن پنج پارامتر عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، شیب توپوگرافی (T) و کاربری اراضی (LU) به کار برده می شود [۱]. در روش SI، پارامترها بر اساس واحدهای تشکیل دهنده بین صفر تا ۱۰۰ ارزش گذاری می شوند و پس از وزن دهی شاخص (SI) طبق معادله ۳ محاسبه می شود.

صورت ثابت یا خطی است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید [۲۴]. در مطالعه حاضر، از مدل فازی ساجنو به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری و بهینه‌سازی وزن‌های روش ترکیبی استفاده شده است. در این مدل، نتایج به‌دست آمده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI به‌عنوان ورودی‌های مدل و متوسط شاخص آسیب‌پذیری تصحیح‌شده با مقادیر نیترا با عنوان خروجی مدل تعریف شده است. برای اجرای مدل، ۸۰ درصد از داده‌ها برای مرحله آموزش و ۲۰ درصد برای مرحله آزمایش به صورت تصادفی انتخاب شد. در شکل ۳ فلوجارت روش‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر ارائه شده است.



شکل ۳. فلوجارت کلی روش‌های استفاده‌شده برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری دشت قروه-دهگلان

نتایج

نتایج به‌دست آمده از روش DRASTIC

همان‌طور که در بخش‌های قبلی گفته شد، هفت پارامتر مورد نیاز برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری به روش DRASTIC عبارت‌اند از: عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C). برای تهیه لایه‌های رستری مربوط به هر یک از پارامترها، ابتدا داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز تهیه شد. سپس این اطلاعات وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS شده

شرط یا محدودیت دارد. برای هر مسئله بهینه‌سازی، جمعیتی از راه‌حل‌های ممکن انتخاب شده و به بهترین راه‌حل‌های ممکن تبدیل می‌شوند. هر راه‌حل می‌تواند براساس سازگاری‌اش با استفاده از اپراتورهای انتخاب، متقاطع و جهش تغییر یابد [۱۴]. در مطالعه حاضر، از روش الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی وزن‌ها در ترکیب سه روش DRASTIC، SINTACS و SI به‌صورت میانگین وزن‌دار استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، سه وزن مربوط به سه روش آسیب‌پذیری یادشده در روش ترکیبی است. هدف از الگوریتم ژنتیک، تعیین دقیق آسیب‌پذیری آبخوان به صورت مشخص کردن وزن‌های هر یک از سه روش ارزیابی آسیب‌پذیری در روش ترکیبی است. تابع هدف در این مدل بهینه‌سازی، بیشینه کردن ضریب همبستگی بین متوسط آسیب‌پذیری به‌دست آمده از سه روش DRASTIC، SINTACS و SI و غلظت نیترا است. وزن‌های مناسب برای هر روش براساس رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n (VI_j - \overline{VI})(N_j - \overline{N})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (VI_j - \overline{VI})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (N_j - \overline{N})^2}} \quad (6)$$

$$\text{Constant: } 1 \leq W_j \leq 10, j = 1, 2, \dots, 10$$

در رابطه یادشده، F تابع هدف، n تعداد داده، VI_j شاخص آسیب‌پذیری ترکیب سه روش، \overline{VI} میانگین شاخص آسیب‌پذیری ترکیب سه روش، N_j غلظت نیترا (No3)، \overline{N} میانگین غلظت نیترا (No3) و W_j وزن‌های داده‌شده به سه روش است.

فازی ساجنو (VI-SFL)

تئوری فازی برای نخستین بار توسط Zadeh در سال ۱۹۶۵ ارائه شده است. منطق فازی به‌عنوان جایگزینی برای توضیح عدم قطعیت استفاده شده است. از آنجا که در همه روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، عدم قطعیت به علت خطاهای اطلاعاتی و متغیر بودن پارامترهای هیدروژئولوژیکی، امری ذاتی است، ارائه مدلی که توانایی پاسخ‌گویی در شرایط عدم قطعیت را داشته باشد، ابزار مناسبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری خواهد بود. تئوری فازی براساس نوع تابع عضویت به دو نوع ممدانی و ساجنو تقسیم می‌شود. در روش ممدانی توابع عضویت خروجی، مجموعه‌های فازی هستند، اما در مدل ساجنو، خروجی به

ایه تغذیه خالص، از روش پیسکوپو [۲۵] استفاده شد. در روش پیسکوپو از سه لایه میزان بارش سالیانه، نقشه شیب و نقشه جنس خاک برای تهیه لایه تغذیه استفاده می‌شود. برای تهیه لایه بارش سالیانه، با توجه به اینکه مقدار بارش برای منطقه کمتر از ۵۰۰ میلی‌لیتر است، طبق رتبه‌های ارائه‌شده در روش پیسکوپو (جدول ۱) کل منطقه مطالعاتی رتبه ۱ خواهد داشت. به منظور تهیه نقشه شیب توپوگرافی، ابتدا مدل رقومی ارتفاع منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. سپس، با دستور Slope در محیط این نرم‌افزار، نقشه شیب آماده شد و بعد براساس جدول ۱ رتبه‌بندی انجام گرفت. نقشه جنس خاک نیز با در نظر گرفتن جنس لایه خاک در دو متری لاگ‌های چاه‌های مشاهده‌ای تهیه و رتبه‌بندی شد، به طوری که در این رتبه‌بندی به لایه‌های ریزدانه رتبه کمتر از لایه‌های درشت‌دانه اختصاص یافت. سپس، اطلاعات به دست آمده در محیط نرم‌افزار ArcGIS به روش IDW درون‌یابی شده و به رستر تبدیل شد. در نهایت، سه لایه تهیه‌شده طبق رابطه ۷ همپوشانی شد و لایه تغذیه خالص به دست آمد (شکل ۴-ب).

(۷) تغذیه خالص = نفوذپذیری خاک + میزان بارندگی + شیب توپوگرافی

و در نهایت لایه رستری آماده شد که چگونگی ایجاد هر یک از لایه‌ها در ادامه به اختصار توضیح داده شده است.

عمق آب زیرزمینی (D): پارامتر عمق آب زیرزمینی نشان‌دهنده عمقی است که آلاینده باید برای رسیدن به سطح ایستابی طی کند. برای تهیه این لایه، اطلاعات عمق آب ۹۱ پیزومتر موجود در منطقه مطالعاتی برای سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶، در فرمت قابل قبول به محیط نرم‌افزار Arc GIS وارد شد. پس از آن، به روش IDW درون‌یابی شده و سپس به فرمت رستر تبدیل شد. در مرحله بعد با استفاده از رتبه‌بندی ارائه‌شده توسط آلر و همکاران (۱۹۸۷)، رتبه‌دهی انجام گرفت، به طوری که برای عمق‌های کمتر، رتبه بیشتر و برای عمق‌های بیشتر، رتبه کمتر اختصاص یافت و به این ترتیب، لایه عمق آب زیرزمینی تهیه شد (شکل ۴-الف).

تغذیه خالص (R): تغذیه خالص آبخوان نشان‌دهنده مقدار آبی است که از طریق بارش به زمین نفوذ می‌کند و به سطح آب‌های زیرزمینی می‌رسد. تغذیه امکان رسیدن آلاینده‌ها به آب زیرزمینی را فراهم می‌کند، به طوری که هر چقدر میزان تغذیه بیشتر باشد، احتمال رسیدن آلاینده‌ها از سطح زمین به آب زیرزمینی هم افزایش می‌یابد. برای تهیه ل

جدول ۱. امتیازهای پارامترهای تغذیه خالص آبخوان [۲۵]

شیب (%)		بارندگی (میلی‌متر بر سال)		نفوذپذیری خاک		میزان تغذیه	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۴	> ۲	۴	< ۸۵۰	۵	زیاد	۱۰	۱۱-۱۳
۳	۲-۱۰	۳	۷۰۰-۸۵۰	۴	توسط تا زیاد	۸	۹-۱۱
۲	۱۰-۳۳	۲	۵۰۰-۷۰۰	۳	متوسط	۵	۷-۹
۱	< ۳۳	۱	> ۵۰۰	۲	کم	۳	۵-۷
				۱	خیلی کم	۱	۳-۵

IDW درون‌یابی شده و به فرمت رستری تبدیل شد. به این ترتیب، لایه محیط آبخوان آماده شد (شکل ۴-پ).

محیط خاک (S): لایه محیط خاک که قسمت بالایی منطقه غیراشباع است، بر حرکت سطحی و رو به پایین آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. برای تهیه این لایه، از جنس لایه سطحی خاک به ضخامت ۲ متر از لاگ‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد. بعد از رتبه‌دهی براساس جنس رسوبات لایه سطحی خاک، داده‌ها به روش IDW درون‌یابی شده و سپس به فرمت رستری تبدیل شد (شکل ۴-ت).

محیط آبخوان (A): منظور از محیط آبخوان همان جنس بخش اشباع آبخوان است که میزان تخلخل، جنس، اندازه و جورشده‌گی ذرات میزان رقیق شدن آلودگی بر اثر تجزیه شیمیایی، جذب و پخش را کنترل می‌کند. برای تهیه این لایه از اطلاعات لاگ چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه استفاده شد و براساس جنس لایه‌های آبخوان، رتبه‌بندی انجام گرفت، به طوری که برای رسوبات ریزدانه، رتبه کمتر و برای رسوبات درشت‌دانه، رتبه بیشتر اختصاص یافت. سپس، داده‌های به دست آمده به روش

نتایج به‌دست آمده از روش SINTACS

در روش SINTACS از هفت پارامتر عمق سطح ایستابی (S)، تغذیه خالص (I)، اثر منطقه غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب توپوگرافی (S) برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری و تهیه نقشه آسیب‌پذیری استفاده می‌شود. مراحل تهیه پارامترهای روش سینتکس مشابه روش دراستیک است، با این تفاوت که رتبه‌دهی به پارامترها در روش سینتکس متفاوت است و انعطاف بیشتری دارد. بعد از تهیه لایه‌های رتبه‌دهی شده که مقادیر رتبه‌های مربوط به هر یک از پارامترها هم در شکل ۵ ارائه شده است [۷]، هفت لایه رستری ایجاد شده با اعمال وزن‌ها (جدول ۲) طبق رابطه ۲ همپوشانی شد و نقشه توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان به دست آمد (شکل ۵-ح). شاخص آسیب‌پذیری سینتکس عددی بین ۱۰۰ تا ۱۸۶ به دست آمد که آسیب‌پذیری آبخوان در دو گروه آسیب‌پذیری متوسط (۱۰۰ تا ۱۴۳) و زیاد (۱۴۳ تا ۱۸۶) قرار گرفت.

نتایج به‌دست آمده از روش SI

همان‌طور که گفته شد، روش SI برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلاینده‌های کشاورزی ارائه شده است که در آن از پنج پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، شیب توپوگرافی و کاربری اراضی (LU) استفاده می‌شود [۱]. به جز پارامتر کاربری اراضی، روش تهیه بقیه پارامترها مشابه روش دراستیک است و فقط مقادیر رتبه‌دهی به پارامترها متفاوت است. برای تهیه لایه کاربری اراضی از Shapefile کاربری اراضی استان کردستان استفاده شد و طبق روش Stiger و همکاران (۲۰۰۶) رتبه‌دهی انجام گرفت که تمام پارامترها در این روش بین صفر تا ۱۰۰ رتبه‌دهی می‌شوند. بعد از تهیه نقشه‌های رتبه‌دهی شده که در شکل ۶ آورده شده است، وزن‌دهی به هر یک از لایه‌ها صورت گرفت (جدول ۲) و براساس رابطه ۳ همپوشانی انجام گرفت و نقشه آسیب‌پذیری به روش SI تهیه شد. با توجه به شکل ۶-ج شاخص آسیب‌پذیری برای آبخوان قروه-دهگلان بین ۲۴/۸ تا ۵۵/۸ به دست آمد که در دو گروه آسیب‌پذیری متوسط (۲۴ تا ۳۵) و زیاد (۳۵ تا ۵۵) قرار می‌گیرد.

توپوگرافی (T): پارامتر توپوگرافی به تغییرات شیب سطح زمین اشاره دارد. این پارامتر زمان ماندگاری آلاینده را روی زمین نشان می‌دهد. هرچه شیب توپوگرافی کمتر باشد، زمان ماندگاری آلاینده در سطح زمین بیشتر شده و در نتیجه، زمان لازم برای نفوذ آلاینده فراهم می‌شود و آلاینده بیشتری به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند. برای تهیه لایه توپوگرافی، ابتدا مدل رقومی شده ارتفاع (DEM) منطقه تهیه و سپس نقشه درصد شیب از آن استخراج شد و در نهایت، براساس رتبه‌دهی ارائه شده توسط آلر و همکاران (۱۹۸۷) رتبه‌دهی انجام شد و لایه توپوگرافی به دست آمد (شکل ۴-ث).

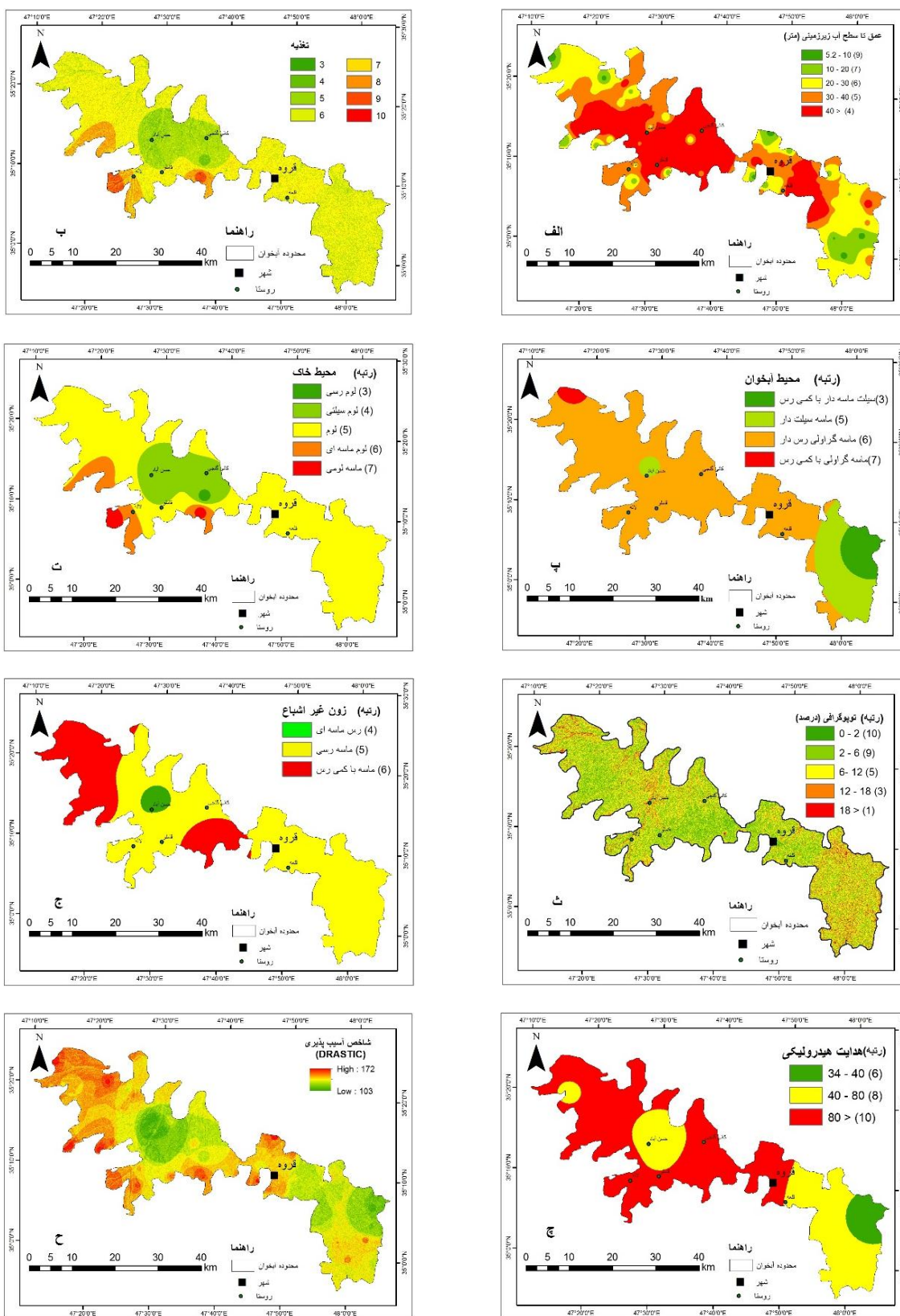
محیط غیراشباع (I): محیط غیراشباع ضخامت از

رسوبات که از زون خاک سطحی تا سطح ایستابی قرار گرفته‌اند را شامل می‌شود. روش تهیه لایه محیط غیراشباع، مشابه لایه محیط آبخوان است با این تفاوت که برای تهیه این لایه از جنس رسوبات منطقه غیراشباع استفاده می‌شود. در این روش نیز بعد از تهیه داده‌های رتبه‌دهی شده، درون‌یابی انجام گرفت و سپس به لایه رستری تبدیل شد و لایه محیط غیراشباع به دست آمد (شکل ۴-ج).

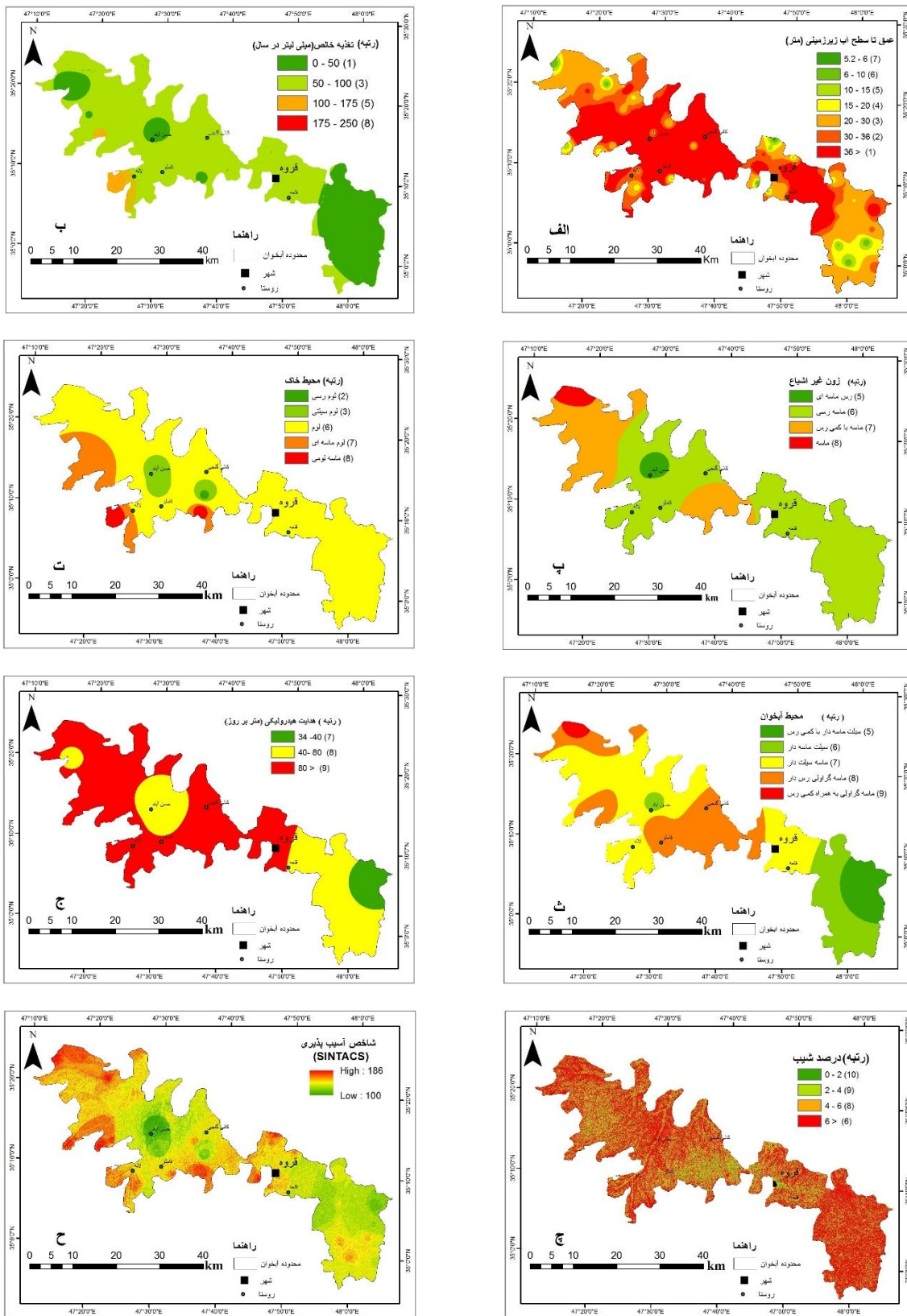
هدایت هیدرولیکی (C): پارامتر هدایت هیدرولیکی،

توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در انتقال آب را نشان می‌دهد و به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم بستگی دارد. برای تخمین هدایت هیدرولیکی در منطقه مطالعاتی از دانه‌بندی ذرات تشکیل‌دهنده آبخوان و درصد هریک از مواد تشکیل‌دهنده آبخوان استفاده شد [۲۶]. و میزان هدایت هیدرولیکی برای منطقه بین ۳۴ تا ۹۰ متر بر روز به دست آمد. سپس، داده‌ها به روش IDW درون‌یابی شده و پس از رتبه‌دهی به فرمت رستر تبدیل شد (شکل ۴-چ).

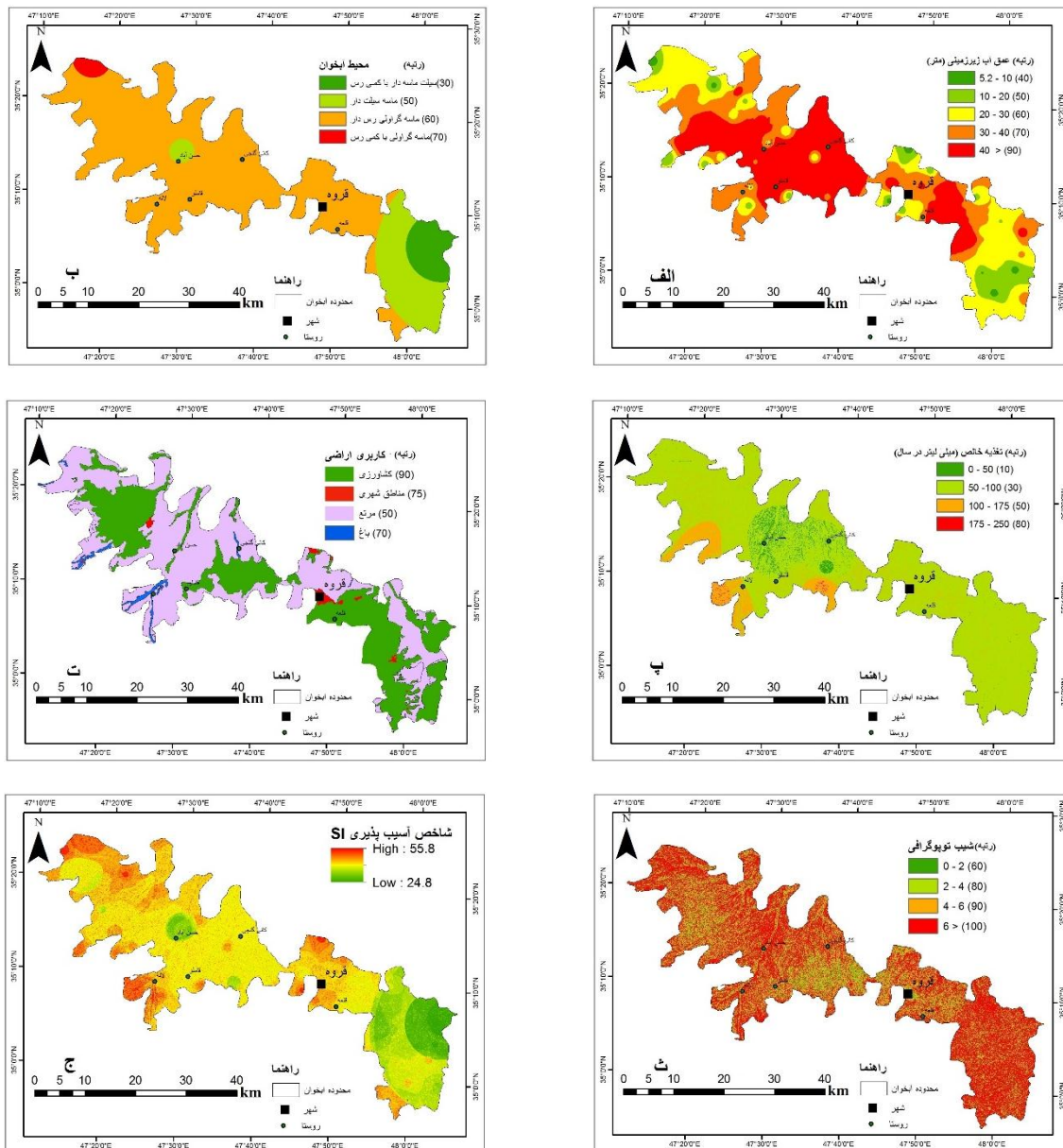
بعد از تهیه هفت لایه دراستیک، وزن‌دهی (جدول ۲) و تلفیق لایه‌ها طبق رابطه ۱ در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نقشه توزیع مکانی شاخص آسیب‌پذیری آبخوان‌های قروه-دهگلان به دست آمد (شکل ۴-ح). شاخص آسیب‌پذیری دراستیک بین ۱۰۳ تا ۱۷۲ به دست آمد که براساس طبقه‌بندی آلر و همکاران (۱۹۸۷)، آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان در دو گروه آسیب‌پذیری متوسط (۱۰۳ تا ۱۲۶) و زیاد (۱۲۶ تا ۱۷۲) قرار می‌گیرد.



شکل ۴. لایه‌های روش DRASTIC (الف) عمق آب زیرزمینی (ب) میزان تغذیه خالص (پ) محیط آبخوان (ت) محیط خاک (ث) توپوگرافی (ج) زون غیر اشباع (چ) هدایت هیدرولیکی (ح) نقشه آسیب پذیری DRASTIC



شکل ۵. لایه‌های روش SINTACS (الف) عمق آب زیرزمینی (ب) تغذیه خالص (پ) زون غیراشباع (ت) محیط خاک (ث) محیط آبخوان (ج) هدایت هیدرولیکی (چ) شیب توپوگرافی (ح) نقشه آسیب‌پذیری SINTACS



شکل ۶. لایه‌های روش SI (الف) عمق آب زیرزمینی (ب) تغذیه خالص (پ) محیط آبخوان (ت) شیب توپوگرافی (ث) کاربری اراضی (ج) نقشه آسیب‌پذیری به روش SI

صحت‌سنجی و مقایسه روش‌ها

برای صحت‌سنجی روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری از داده‌های غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در ۶۵ نقطه از منطقه مطالعاتی با توزیع مناسب استفاده شد (شکل ۷). با انطباق مقادیر غلظت نیترات روی هر یک از نقشه‌های آسیب‌پذیری DRASTIC، SINTACS و SI مشاهده شد که مطابقت کمی بین مقادیر نیترات و نقشه‌های آسیب‌پذیری وجود دارد، بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر سه روش، ضریب همبستگی (r) و شاخص همبستگی (CI)

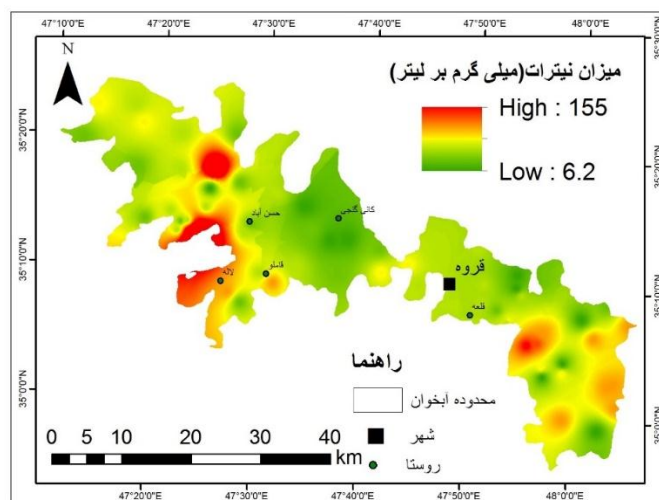
بین شاخص آسیب‌پذیری روش‌ها با میزان نیترات محاسبه شد. ضریب همبستگی بین میزان غلظت نیترات و روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI، به ترتیب برابر ۰/۴۲، ۰/۳۲ و ۰/۰۷ به دست آمد که براساس آن، به ترتیب روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI عملکرد بهتری دارند. بنابراین، روش DRASTIC نسبت به بقیه روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری مناسب‌تر است. برای محاسبه شاخص همبستگی، ابتدا مقادیر نیترات به چهار گروه نیترات کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم

بیشتری برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری دارد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه ضریب همبستگی و شاخص همبستگی می‌توان نتیجه گرفت که هر یک از این معیارهای ارزیابی روش‌های متفاوتی را به عنوان روش بهتر ارائه می‌دهند (جدول ۳). بنابراین، انتخاب یکی از این روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری منطقی به نظر نمی‌رسد. به همین منظور، در تحقیق حاضر برای دستیابی به یک نتیجه واحد و ارائه نوعی روش به عنوان روش بهتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری، از ترکیب سه روش SI و SINTACS، DRASTIC استفاده شد. سه روش یادشده با سه روش متفاوت از جمله روش‌های ترکیبی وزن‌دار، الگوریتم ژنتیک و مدل فازی ترکیب شدند که نتایج هر یک از این روش‌های ترکیبی در ادامه ارائه شده است.

می‌شود، سپس تعداد نمونه‌هایی که مقادیر نیترات آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری ارزش یکسانی دارد به ۴ ضرب می‌شوند. تعداد نقاطی که مقادیر نیترات و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار ۱، ۲ و ۳ اختلاف دارند، به ترتیب در ۳، ۲ و ۱ ضرب می‌شوند. سپس، مقادیر به‌دست‌آمده با هم جمع بسته می‌شود و شاخص همبستگی (CI) به دست می‌آید که CI زیادتر به معنای همبستگی بیشتر است [۲۷]. در جدول ۳، چهار سطح آلودگی نیترات و گروه‌های آسیب‌پذیری مربوط به هر یک از روش‌های SI و SINTACS، DRASTIC ارائه شده است. براساس CI محاسبه‌شده در جدول ۳، روش SINTACS بیشترین شاخص همبستگی را دارد، ولی روش‌های SI و DRASTIC به ترتیب دارای شاخص همبستگی کمتری هستند. نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه CI نشان داد روش SINTACS نسبت به بقیه روش‌ها، اولویت

جدول ۲. وزن نسبی پارامترهای روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی

وزن نسبی			پارامترهای روش
SI	SINTACS	DRASTIC	
۰/۱۸۶	۵	۵	عمق آب زیرزمینی
۰/۲۱۲	۴	۴	تغذیه خالص
۰/۲۵۹	۳	۳	محیط آبخوان
-	۴	۲	نوع خاک
۰/۱۲۱	۲	۱	توپوگرافی
-	۵	۵	محیط غیر اشباع
-	۳	۳	هدایت هیدرولیکی
۰/۲۲۲	-	-	کاربری اراضی



شکل ۷. نقشه هم‌نیترات منطقه مطالعه‌شده

نتایج روش‌های ترکیبی

در روش‌های ترکیبی با تلفیق نتایج به دست آمده از سه روش DRASTIC، SINTACS و SI در عین حال که از مزیت هر سه روش استفاده می‌کند، در نهایت به یک جواب واحد می‌رسد. به این منظور، برای ترکیب سه روش یادشده با روش ترکیبی وزن دار، ابتدا شاخص‌های آسیب‌پذیری هر سه روش با استفاده از رابطه ۴ نرمال سازی شد. سپس، با استفاده از رابطه ۵ شاخص آسیب‌پذیری کل با در نظر گرفتن شاخص همبستگی و شاخص آسیب‌پذیری مربوط به هر یک از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI محاسبه شده و نقشه نتایج آسیب‌پذیری تهیه شد (شکل ۸-ت). نتیجه به دست آمده از محاسبه شاخص همبستگی بین نقشه ترکیبی حاصل و میزان نیترا نشان داد شاخص همبستگی به دست آمده از روش ترکیبی علاوه بر حل مشکل عدم قطعیت صحت‌سنجی‌ها میزان شاخص همبستگی بیشتری نسبت به هر سه روش منفرد دارد و نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد (جدول ۳).

روش دیگری که برای ترکیب روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI در تحقیق حاضر به کار برده شده، استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای اجرای روش الگوریتم ژنتیک، ابتدا برای هر یک از شاخص‌های آسیب‌پذیری به دست آمده از سه روش DRASTIC، SINTACS و SI وزن‌های تصادفی داده شد. وزن‌های تصادفی در نظر گرفته شده همان متغیرهای تصمیم مسئله هستند. قیود شرط نیز برای هر پارامتر به گونه‌ای تعریف شد که بیشترین مقدار متغیر یا همان وزن‌ها برابر ۱۰ و کمترین آن برابر ۱ در نظر گرفته شد. سپس، با بیشینه کردن تابع هدف که همان ضریب همبستگی بین غلظت نیترا و میانگین وزنی شاخص آسیب‌پذیری سه روش است (معادله ۶)، وزن‌های جدید و بهینه شده‌ای به دست آمد که در جدول ۴ ارائه شده است. در نهایت، بر اساس این وزن‌های بهینه، نقشه آسیب‌پذیری کل به روش الگوریتم ژنتیک برای منطقه تهیه شد (شکل ۸-ث).

در روش دیگری، از مدل فازی ساجنو (SFL) به منظور ترکیب نتایج سه روش DRASTIC، SINTACS و SI استفاده شد. پارامتر اصلی در مدل ساجنو برای تعیین دسته‌ها، شعاع دسته‌بندی است که مقدار آن بین صفر و

یک است [۲۸]. در تحقیق حاضر، به منظور کلاسترینگ فازی، شعاع‌های دسته‌بندی متفاوت از ۰/۱ تا ۱ بررسی شد و قوانین متفاوتی نیز تولید شد. سپس، شعاع دسته‌بندی ۰/۱ بر اساس کمترین مقدار RMSE به عنوان شعاع دسته‌بندی بهینه انتخاب شد و ۵۱ قانون اگر - آن‌گاه ایجاد شد. همچنین، تابع عضویت به کار برده شده از نوع تابع عضویت گوسی است. در این مدل برای مرحله آموزش مقادیر RMSE و r به ترتیب ۰/۰۲۶ و ۰/۷۳ به دست آمد. سپس، مدل برای مرحله آزمایش اجرا شد و آسیب‌پذیری مدل با RMSE برابر ۰/۰۲۹ و r برابر ۰/۶۷ به دست آمد. شکل ۸-ج نقشه آسیب‌پذیری به دست آمده از مدل فازی ساجنو برای منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از روش‌های منفرد و ترکیبی که در جدول ۳ ارائه شده است، ملاحظه می‌شود که روش ترکیبی با مدل فازی ساجنو، ضریب همبستگی را به صورت چشمگیری افزایش داده است. همچنین، شاخص همبستگی (CI) نیز در این روش بیشتر از بقیه روش‌های ترکیبی و منفرد است. بنابراین، روش ترکیبی با مدل ساجنو روش بهتری برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه مطالعه شده است که بر اساس این روش به ترتیب حدود ۲۱/۵، ۴۹/۴، ۲۴/۷ و ۴/۴ درصد از آبخوان قروه-دهگلان در محدوده آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار دارد.

بحث

بر اساس نتایج سه روش DRASTIC، SINTACS و SI نقشه‌های آسیب‌پذیری به دست آمده با وجود تفاوت‌های موجود بین روش‌ها، شباهت‌های کلی دارند. با این وجود، بخش‌هایی با آسیب‌پذیری کم که عموماً شامل بخش میانی و شرقی دشت می‌شود در نقشه‌های خروجی دو روش DRASTIC و SINTACS مشابهت بیشتری دیده می‌شود. همین‌طور، بخش‌های میانی دشت در روش SI مقادیر آسیب‌پذیری بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین، انتخاب یکی از این روش‌ها به عنوان روش برتر کاری منطقی نخواهد بود و برای استفاده هم‌زمان از مزیت‌های هر یک از این روش‌ها نیاز به استفاده از روش‌های ترکیبی است. این نتایج تأییدکننده مطالعات قبلی در بررسی آسیب‌پذیری آبخوان‌های دیگر در کشور بودند [۱۷، ۲۹ و

جدول ۳. شاخص همبستگی محاسبه‌شده برای روش‌های مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه

شاخص همبستگی (CI)	بسیار زیاد	زیاد	متوسط	کم	نیترا	میزان آسیب‌پذیری	ضریب همبستگی (r)	روش
۲۰۳	۰	۴	۷	۳	متوسط	۰/۴۲	DRASTIC	
	۲	۸	۳۴	۷	زیاد			
۲۱۵	۱	۱۰	۲۵	۷	متوسط	۰/۳۲	SINTACS	
	۱	۲	۱۶	۳	زیاد			
۱۷۹	۰	۶	۵	۳	متوسط	۰/۰۷	SI	
	۲	۶	۱۳	۷	زیاد			
۲۲۰	۰	۳	۱	۲	کم	۰/۴۳	VI	
	۱	۹	۲۷	۸	متوسط			
۲۱۶	۱	۰	۱۳	۰	زیاد	۰/۴۴	VI-GA	
	۰	۴	۲	۰	کم			
۲۲۹	۱	۷	۲۶	۱۰	متوسط	۰/۶۷	VI-SFL	
	۱	۱	۱۳	۰	زیاد			
	۰	۰	۰	۰	بسیار زیاد			
	۰	۰	۱۰	۵	کم			
	۲	۲	۲۶	۴	متوسط			
	۰	۶	۵	۱	زیاد			
	۰	۴	۰	۰	بسیار زیاد			

جدول ۴. ضرایب وزنی بهینه‌شده به روش الگوریتم ژنتیک (GA)

روش	وزن‌های بهینه‌شده به روش GA
DRASTIC	۶/۳
SINTACS	۴/۶
SI	۱/۷

روش‌های منفرد و پایین‌تر از ترکیبی نظارت‌نشده بود. بنابراین، نمی‌توان آن را به عنوان روشی با کارایی زیاد در نظر گرفت. براساس شکل ۸، نتایج روش‌های ترکیبی نظارت‌نشده و نظارت‌شده الگوریتم ژنتیک شباهت زیادی با نتایج روش‌های منفرد دارند که نشان می‌دهد به طور کلی نتوانسته‌اند افزایش زیادی در بازده روش‌ها ایجاد کنند که این موضوع به خلاف نتایج مطالعات قبلی است [۱۷ و ۲۱]. بنابراین، می‌توان دلیل آن را در خصوصیات منطقه مطالعاتی دانست که نتایج این دو مدل ترکیبی به خصوصیات هر منطقه بستگی دارد و می‌تواند نتایج متفاوتی ارائه کند.

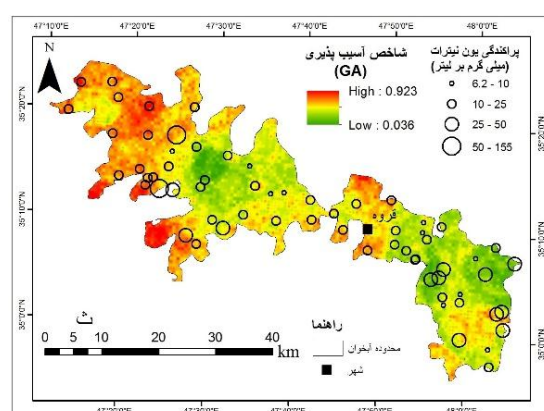
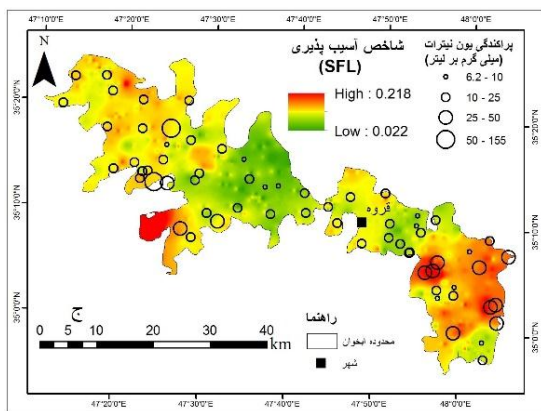
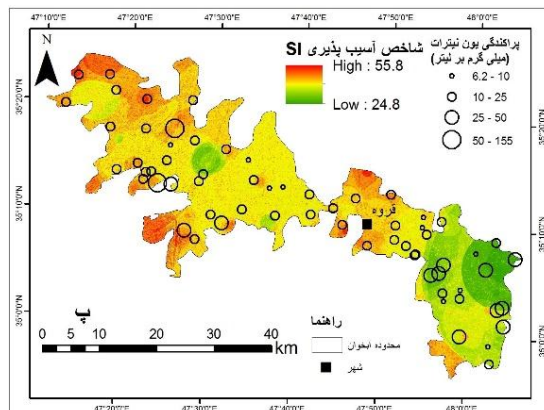
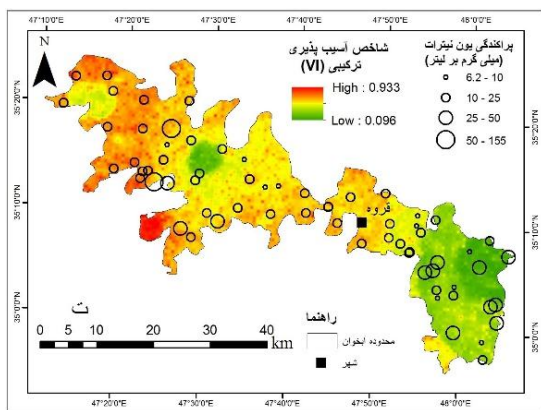
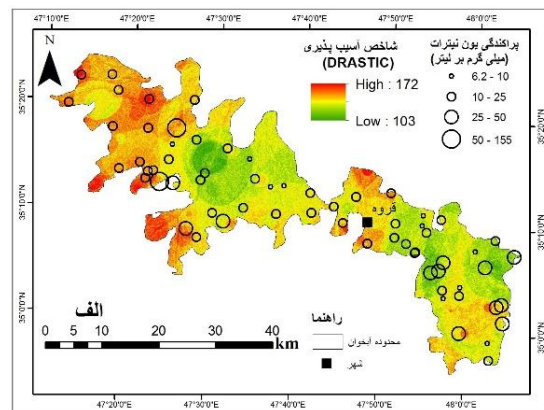
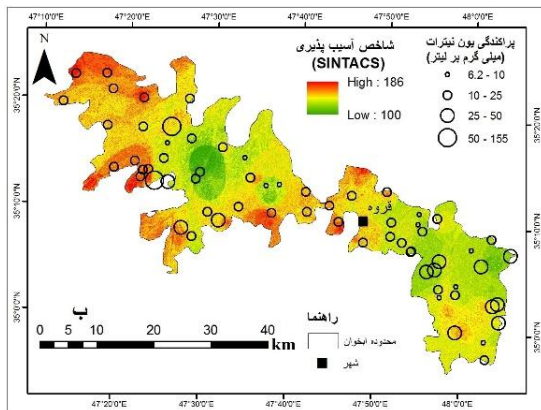
به خلاف دو روش ترکیبی یادشده روش ترکیبی مدل فازی ساجنو بازده خوبی نسبت به روش‌های منفرد و

۳۰] به طوری که روش‌های مختلف آسیب‌پذیری می‌توانند بر حسب توانایی‌های خود در برخی مناطق نتایج بهتری داشته باشند.

روش‌های ترکیبی نظارت‌نشده که پیش‌تر توسط جوانشیر و همکاران [۱۷] ارائه شده بود، در مطالعه حاضر نتوانست کارایی زیادی نشان دهد و نتایج به‌دست‌آمده از این روش فقط توانست حدود ۳ درصد از شاخص همبستگی و ضریب همبستگی را نسبت به نتایج بهترین روش منفرد افزایش دهد. این در حالی است که روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک که روش ترکیبی نظارت‌شده است، نتایج مشابهی با نوع ترکیبی نظارت‌نشده داشت. با این وجود ضریب همبستگی این روش بیشتر از روش‌های منفرد و ترکیبی بود، ولی شاخص همبستگی بیشتر از

وسیع‌تری نسبت به باقی روش‌ها دارد. این نتایج تأییدکننده نتایج مطالعات قبلی بوده [۱۹ و ۲۰] و دلیل این برتری را در توانایی مدل‌های فازی در مدل‌سازی پارامترهایی با عدم قطعیت زیاد دانست. بنابراین، از مدل فازی ساجنو می‌توان به عنوان روشی کارا در ترکیب روش‌های مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری در مناطق دیگر استفاده کرد.

ترکیبی دیگر داشت، به طوری که توانست ۳۷ درصد ضریب همبستگی و ۷ درصد شاخص همبستگی را نسبت به نتایج بهترین مدل منفرد افزایش دهد. همچنین، براساس نقشه آسیب‌پذیری به دست آمده از روش ترکیبی، فازی ساجنو به خلاف سایر روش‌های منفرد و ترکیبی، جنوب آبخوان آسیب‌پذیری بیشتری دارد و بخش‌های میانی دشت که مناطق با آسیب‌پذیری کم است، گسترش



شکل ۸. نقشه‌های آسیب‌پذیری به دست آمده از روش‌های الف) DRASTIC، ب) SINTACS، پ) SI، ت) ترکیبی، ث) الگوریتم ژنتیک، ج) فازی ساجنو

نتیجه‌گیری

دشت قروه-دهگلان به‌ترتیب در محدوده آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار دارد که بیشتر بخش‌های شمال‌غرب و قسمتی از جنوب شرق دشت پتانسیل آلودگی بیشتری نسبت به سایر مناطق دشت دارد و باید محافظت بیشتری از این مناطق صورت بگیرد.

منابع

- [1]. Stigter TY, Ribeiri L, Carvalho Dill AMM. Evaluation of an intrinsic and a specific Vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology journal*. 2006; 14:79-99.
- [2]. Amasri MN. Asssment of intrinsic Vulnerability to contamination for Gaza Coastal aquifer, palestine. *Journal of Environmental management*. 2008; 88:577-593.
- [3]. Maarofi S, Soleymani S, Ghobadi M, Rahimi Gh, Maarofi H. Malayer aquifer vulnerability assessment using models DRASTIC, SI and SINTACS. *Soil and Water Research Journal*. 2011; 19(3). [Persian]
- [4]. Foster SS. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W, Van Waegeningh, HG (Eds.), *Vulnerability of Soils and Groundwater to Pollution*. TNO Committee of Hydrological Research, the Hague, Proceedings and information; 1987. 38: 69-86.
- [5]. Aller L, Bennet T, Leher J, Petty R., Hackett G. DRASTIC: A Standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings, Kerr Environmental Research Laboratory. U.S Environmental Protection Agency Report. 1987; (EPA/600/2-87/035).
- [6]. Van Stemproot D. Evert L, Wassenaar L. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*; 1994. 18: 25-37.
- [7]. Civita M, Massimo. *Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps, Studi sulla Vulnerabilita degli Acquiferi*, Pitagora Edir, Bologna; 1990.
- [8]. Ribeiro L. Desenvolvimento de um Índice para avaliar a susceptibilidade, ERSMA-CVRM; 2000.

هدف از پژوهش حاضر، تعیین آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت قروه-دهگلان با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI و سپس ترکیب این سه روش به منظور استفاده از مزیت‌های آنها در ارزیابی آسیب‌پذیری است. دشت قروه-دهگلان بزرگ‌ترین دشت استان کردستان است که از نظر کشاورزی اهمیت زیادی برای این استان دارد. با توسعه کشاورزی استفاده از کودهای کشاورزی نیز افزایش یافته است. این مواد به همراه پساب‌ها و فاضلاب‌های به‌وجودآمده از منطقه، آب‌های زیرزمینی را بیشتر در معرض خطر آلودگی قرار داده است. بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت و تعیین مناطق با پتانسیل زیاد آلودگی ضرورت دارد. به همین منظور، نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مطالعاتی با روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI تهیه شد. سپس، به منظور صحت‌سنجی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از سه روش یادشده از معیارهای ضریب همبستگی (r) و شاخص همبستگی (CI) استفاده شد که بیشترین ضریب همبستگی برای روش DRASTIC به میزان ۰/۴۲ و بیشترین شاخص همبستگی برای روش SINTACS به میزان ۰/۲۱۵ به دست آمد. با توجه به اینکه هر یک از معیارهای ارزیابی روش‌های متفاوتی را به عنوان روش بهتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه ارائه داد، بنابراین در تحقیق حاضر برای دستیابی به یک نتیجه واحد و در نظر گرفتن مزیت‌های همه روش‌ها از ترکیب سه روش DRASTIC، SINTACS و SI استفاده شد. سه روش یادشده با روش‌های مختلف از جمله روش ترکیبی وزن‌دار، الگوریتم ژنتیک و مدل فاز ساجنو ترکیب شدند و نتایج به‌دست‌آمده از این سه روش ترکیبی نیز مقایسه شد. نتایج نشان داد شاخص همبستگی هر سه روش ترکیبی بیشتر از روش‌های منفرد (DRASTIC، SINTACS و SI) است و در بین روش‌های ترکیبی، روش ترکیبی مدل فازی ساجنو بیشترین شاخص همبستگی دارد. همچنین، ضریب همبستگی این روش از بقیه روش‌های ترکیبی و منفرد بیشتر است. بنابراین، مدل فازی ساجنو روش بهتری برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه-دهگلان نسبت به بقیه روش‌ها است که دلیل آن را می‌توان در توانایی زیاد این مدل در مدل‌سازی پارامترهایی با عدم قطعیت زیاد دانست. براساس این روش حدود ۲۱/۵، ۴۹/۴، ۲۴/۷ و ۴/۴ درصد از آبخوان

- [9]. Asghari Moghaddam A, Fijani E, Nadiri AA. Groundwater Vulnerability Assesment Using GIS-Based DRASTIC Model in the Bazargan and Poldasht Plains. *Journal of Environmental Studies*. 2010; 35, 52.
- [10]. AsghariMoghaddam A, Barzegar R. Investigation of Nitrate Concentration Anomaly Source and Vulnerability of Groundwater Resources of Tabriz Plain Using AVI and GOD Methods. *Water and soil Science*. 2015; 24(4): 11-27. [Persian].
- [11]. Fakhri MS, AsghariMoghaddam A, Najib M Barzegar R. Investigation of nitrate cintrations in groundwater resources of Marand plain and groundwater vulnerability assessment using AVI and GODS methods. *Joirnal of Environmental Studies*. 2015; 41(1): 49-66. [Persian].
- [12]. Bai L,Wang Y, Meng F. Application of DRASTIC and extension theory in the groundwater vulnerability evaluation. *Water and Environment journal*. 2012; 26(3):381–391.
- [13]. Huan H, Wang J, Teng Y. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Sci Total Environ*. 2012; 440:14–23.
- [14]. Jafari SM, Nikoo MR. Groundwater risk assessment based on optimization framework using DRASTIC method. *Arab J Geosci*. 2016; 9:742.
- [15]. Hamza, MH, Added A, France’s A, Rodri’guez R. Validite’ de l’application des me’todes de vulne’rabilite’ DRASTIC, SINTACS, SI et a l’e’tude de la pollution par lesnitrates dans la nappe phre’atique de Metline Ras Jebel-Raf Raf, *Compets Rendus Geoscience*. 2007; 339:493-505.
- [16]. Asghari Moghaddam A , Gharekhani M, Nadiri AA, Kord M, Fijani E. Evaluation of intrinsic vulnerability of Ardabil plain using DRASTIC, SINTACS and SI methods. *Journal of geography and planning*. 2017; 21 (61): 57-74.
- [17]. Javanshir G, Nadiri AA, Sadeghfam S, Abbas novinpour A. Introducing a new method to aquifer vulnerability assessment of Moghan plain based on combination of DRASTIC, SINTACS and SI methods. *Ecohydrology Journal*. 2016: 496-467. [Persian]
- [18]. Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Asghari Moghaddam A. Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Sci Total Environ*. 2017; 574:691– 706.
- [19]. Nadiri AA, Gharekhani M, Khatibi R, Asghari Moghaddam A. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environ Sci Pollut Res*. 2017; 24(9):8562–8577.
- [20]. Nadiri AA, Sedghi Z, Khatibi R, Gharekhani M. Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Sci Total Environ*. 2017; 593-594:75–90.
- [21]. Nadiri AA, Gharekhani M., Khatibi R. Mapping Aquifer Vulnerability Indices Using Artificial Intelligence-running Multiple Frameworks (AIMF) with Supervised and Unsupervised Learning. *Journal of Water Resource Management*. 2018; 32: 3023–3040.
- [22]. Boughriba M, Barkaoui A, Zarhloue Y, Lahmer Z, El-Houadi B, Verdoya M. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geoscience*. 2009; 3:207-220.
- [23]. Panagopoulos G, Antonakos A, Lambrakis N. Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*. 2005; 12: 432-458.
- [24]. Nadiri AA, Naderi K, Khatibi R, Gharekhani M. Modelling groundwater level variations by learning from multiple models using fuzzy logic. *Hydrological Sciences journal*. 2019; 64: 210-226.
- [25]. Piscopo G. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlreagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia; 2001.
- [26]. Todd D K. Mays L W. *Groundwater Hydrology*. Third Ed., John Wiley & Sons Inc., U.S.A; 2005.
- [27]. Fijani E, Nadiri AA, Asghari Moghadam A; Tsai F T-C, Dixon B. Optimaization of DRASTIC Method by Supervised Commitww Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. *Journal of hydrology*. 2013; 530: 89-100.
- [28]. Hongxing L, Chen P C P, Huang H P. *Fuzzy Neural Intelligent System, Mathematical Foundation and the Application in Engineering*, CRC Press LLC; 2001.
- [29]. Nadiri A, Sedghi Z, Evaluation of multiple aquifer vulnerability using DRASTIC, SINTACS methods. *Journal of Hydrogeology*, 2019, In press.
- [30]. Faal Aghdam R, Nadiri AA, Abbas Novinpour E. Evaluation of Bilverdi plain aquifer vulnerability based on combination of DRASTIC and SINTACS methods, 2018, 6(3): 135-150.